岩爆预测评估方法的动力数值分析

孙飞跃[1],刘希亮[1,3],郭佳奇[1,3],石晓燕[2],武文龙[1]

(1.河南理工大学土木工程学院,454000 焦作;2.军事科学院国防工程研究院,471023 洛阳;
3.河南省地下工程与灾变防控重点实验室,454000 焦作)

摘　要:精准的预测评估是制定岩爆防治策略的重要前提。采用 FISH 语言编程对 $FLAC^{3D}$ 数值模拟软件进行二次开发,基于动力数值分析,将6种岩爆预测评价指标引用到锦屏Ⅱ级水电站4#引水隧洞数值模拟岩爆案例中,对岩爆的孕育过程和形成机制进行深入剖析。研究结果表明:隧洞掌子面右侧边墙及拱腰部位发生了以剪切破坏为主的突发性破坏,洞室周围岩体破裂演化的平缓加速历程是围岩内部能量逐渐积聚、耗散的过程;在进行岩爆发生位置预测时,Turchaninov 判据较 Hoek、Russenes 判据与现场情况更为符合,直接验证了其作为岩爆发生位置判据的合理性。研究成果可为类似工程提供借鉴和参考。

关键词:隧道;岩爆;岩爆预测;动力数值计算

中图分类号:P694　　　　**文献标志码:**A

Dynamic numerical calculation analysis of rockburst prediction assessment methods

SUN Feiyue[1],LIU Xiliang[1,3],GUO Jiaqi[1,3],SHI Xiaoyan[2],WU Wenlong[1]

(1. College of Civil Engineering,Henan Polytechnic University,454000 Jiaozuo,China;
2. Research Institute for National Defense Engineering,Academy of Military Science PLA China,471023 Luoyang,China;
3. Key Laboratory of Henan Province for Underground Engineeringand Disaster Prevention,454000 Jiaozuo,China)

Abstract: Accurate prediction assessment is an important premise for formulating rockburst prevention strategies. $FLAC^{3D}$ numerical simulation software was secondarily developed by using FISH language programming,and based on dynamic numerical analysis,after a detailed analysis of the evolution process and formation mechanism of rockburst,six kinds of rockburst prediction assessment indexes are applied to No. 4 diversion tunnel of Jinping II Hydropower Station. The results showed that the shear failure occurred mainly in the right side wall and arch haunch of the tunnel face,and the gentle acceleration process of rock fracture evolution around the cavern is also the process of energy accumulation and dissipation in the surrounding rock. When predicting the location of rockburst,Turchaninov criterion is more consistent with the field situation than Hoek and Russenes criterion,because it directly verifies its rationality as the location criterion of rockburst. The research achievements can provide some reference for similar projects.

Key words: tunnel;rockburst;rockburst prediction;dynamic calculation

收稿日期:2020-09-07　　　　**修回日期:**2021-10-17

基金项目:国家自然科学基金(No.51474097;51778215;U1810203);河南理工大学青年骨干教师资助计划(No.2017XQG-08)

通信作者:郭佳奇,副教授。E-mail:gjq519@163.com

引用格式:孙飞跃,刘希亮,郭佳奇,等.岩爆预测评估方法的动力数值分析[J].应用力学学报,2022,39(1):26-34.
SUN Feiyue,LIU Xiliang,GUO Jiaqi,et al. Dynamic numerical calculation analysis of rockburst prediction assessment methods[J]. Chinese journal of applied mechanics,2022,39(1):26-34.

自21世纪以来,我国在交通运输和水利水电等领域的地下洞室工程建设竞相发展,诸如西电东送、西气东输和南水北调等重大工程取得了重大进展。由于深部工程开挖诱导产生的岩爆动力灾害对地下工程具有极大的破坏性,已造成施工设备损毁和施工人员伤亡的严重后果,并产生了巨大经济损失[1-3]。锦屏Ⅱ级水电站引水隧洞是我国水利水电工程中具有代表性的案例之一,最大埋深达2 525 m、最大地应力高达60 MPa[4],在施工期间均发生了不同程度的岩爆动力灾害。为了给深埋地下工程的设计和施工提供更符合工程实际条件的科学依据,和安全合理的理论技术支持,对岩爆动力灾害的预测评估方法进行系统地研究,已成为一种必然地发展趋势,并具有重要的工程意义。

现如今,岩爆动力地质灾害的预测已成为公认的世界性难题之一[5-7]。自岩爆出现以来就一直受到国内外岩石力学工作者和工程研究人员的高度重视,更是近些年国内外有关专家与学者共同关注的焦点。目前,国内外有关专家学者从经典理论、数值模拟和试验方面,针对岩爆动力灾害的预测预报问题开展了大量研究。在预测预报评估理论研究方面,损伤理论、分形理论、岩体失稳理论、突变理论、能量比法、冲击能量指标、应变能储存指标和脆性指数等数十种[8-14]。在试验研究方面,文献[15]得到了岩爆预测智能分类模型。文献[16]为准确预测和防御时滞型岩爆的发生,对岩石失效的时间行为和时滞型岩爆的形成机制进行了试验研究。文献[17]提出了投影寻踪与萤火虫算法相结合的岩爆预测评价方法。文献[18]以室内试验为研究手段,在确定各指标权重的基础上,建立了基于熵权TOPSIS法的岩爆预测模型。在数值模拟研究方面,国内外众多专家学者开展了大量的研究和探讨。文献[19]为了精准预测岩爆的发生,提出了一种用于模拟KCC模型校准的方法。文献[20]以试验和数值模拟为研究手段,确定了JH-2模型参数,同时进行了岩爆分级预测。文献[21]通过采用三维离散元数值模拟软件,针对工程埋深大、地应力高和地质条件复杂等问题,进行了高地应力条件下超长深埋隧洞岩爆预测研究。

如前所述,众多学者从各个角度对岩爆预报预测开展了深入而广泛的研究,对其特征和规律有了一定的认识和理解。但预测评价方法过于单一,未能全面考虑岩爆控制影响因素,如:应力条件与围岩静动态破坏之间的关系,深埋地下洞室开挖过程中关键部位的应力状态与岩爆之间的相关性。进一步了解到在上述预测评估方法中,因数值模拟法具有经济性、可重复性以及定量性等优势,使得该方法在岩爆动力地质灾害的预测评估中使用较多。此外,工程实践表明,围岩体内的应力分布状态和应力集中现象对岩爆的发生具有严重的影响。一般而言,弹性应变能通常积聚在应力较高的区域,其发生的岩爆可能性也越高。而数值模拟法正是通过确定工程区域不同部位、不同开挖阶段的应力集中程度及分布规律,对任意地点,尤其是未施工区域,提前进行岩爆的危险性预测,以及确定洞室开挖中各部位出现最大应力的部位和时间,从而对诱导岩爆的重点区域进行防治。

在运用数值模拟法对岩爆进行预测时,以往研究大多采用静力数值计算法,然而此类方法无法较为真实地反映岩爆的孕育演化过程及其能量动态响应规律。鉴于此,本文对有限差分软件FLAC^{3D}进行二次开发,并基于动力数值分析,以实际工程案例为依托,从常用的6种岩爆预测评价指标与评估方法(Hoek判据、Russenes判据、Turchaninov判据、ERR指标、LERR指标和围岩强度比),对岩爆的倾向性进行预测评估;并探讨深部地下洞室的能量演化规律及其动态响应,研究成果可为类似工程提供一定的参考依据。

1 工程概况

锦屏Ⅱ级水电站4#引水隧洞由东往西开挖,当开挖至K9+728标段时,K9+742～K9+766标段南侧边墙至拱脚部位发生了极强岩爆[22](见图1)。岩爆坑深度大于2 m,岩爆的剧烈冲击使锚杆拉断且严重扭曲变形[23](见图2)。通过现场勘查未发现此标段有控制性结构面,且围岩新鲜完整,该洞段围岩体主要为T_{2b}大理岩,4#引水隧洞断面尺寸见图3[22]。依据现场监测的地应力反演结果[22],该洞段地应力水平较高,具体地应力状态见表1。

表1 4#引水隧洞岩爆段地应力状态

Tab.1 The in-situ stress state of 4# headrace tunnel

埋深/m	σ_x/MPa	σ_y/MPa	σ_z/MPa	τ_{xy}/MPa	τ_{yz}/MPa	τ_{zx}/MPa
1 900	-49.81	-51.68	-58.09	-15	-1.23	-7.17

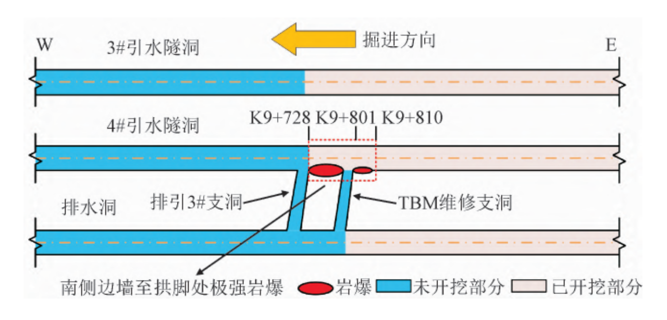


图 1　4#引水隧洞岩爆发生位置示意

Fig. 1　Rockburst location of 4# headrace tunnel

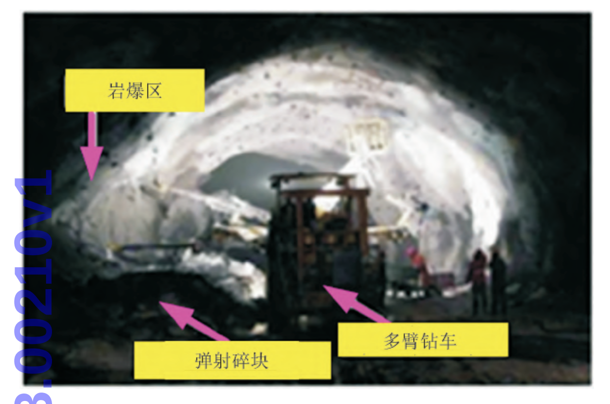


图 2　4#引水隧洞岩爆的处理

Fig. 2　Rockburst treatment of 4# headrace tunnel

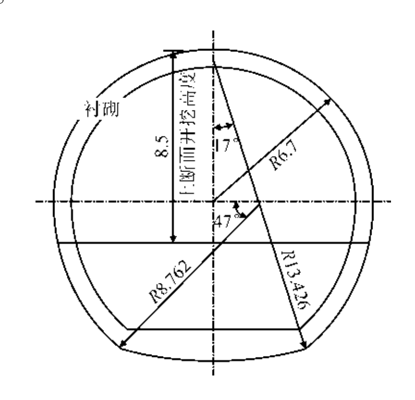


图 3　4#引水隧洞断面尺寸(单位:m)

Fig. 3　Dimension of 4# headrace tunnel (unit:m)

2　岩爆预测理论及其指标

目前各国学者在对动力灾害形成机理进行研究时,从多角度、全方位、多形式相继提出了一系列的经典理论,如:刚度理论、强度理论、能量理论、变形失稳理论和冲击倾向理论等[24-28],并基于各自假设提出了相应的预测评价指标。在数值计算中,通过对三维有限差分软件进行二次开发,采用 FISH 语言编制数据接口程序来实现式(1)~式(6)的表达,并监测所有计算单元的变化过程。

2.1　Hoek 判据

$$\begin{cases}\sigma_{max}/\sigma_C = 0.34(少量片帮,Ⅰ级)\\ \sigma_{max}/\sigma_C = 0.42(严重片帮,Ⅱ级)\\ \sigma_{max}/\sigma_C = 0.56(需重型支护,Ⅲ级)\\ \sigma_{max}/\sigma_C > 0.70(严重岩爆,Ⅳ级)\end{cases} \tag{1}$$

式中:σ_{max} 为隧洞断面最大切向应力;σ_C 为岩石单轴抗压强度。

2.2　Russenes 判据

$$\begin{cases}\sigma_\theta/\sigma_C < 0.2(无岩爆活动)\\ \sigma_\theta/\sigma_C = 0.2 \sim 0.3(低等岩爆)\\ \sigma_\theta/\sigma_C = 0.3 \sim 0.55(中等岩爆)\\ \sigma_\theta/\sigma_C > 0.55(严重岩爆)\end{cases} \tag{2}$$

式中:σ_θ 为洞室切向应力;σ_C 为岩石单轴抗压强度。

2.3　Turchaninov 判据

$$\begin{cases}\sigma_\theta + \sigma_L/\sigma_C < 0.3(无岩爆活动)\\ \sigma_\theta + \sigma_L/\sigma_C = 0.3 \sim 0.5(有岩爆可能)\\ \sigma_\theta + \sigma_L/\sigma_C = 0.5 \sim 0.8(一定会发生岩爆)\\ \sigma_\theta + \sigma_L/\sigma_C > 0.8(有严重岩爆)\end{cases} \tag{3}$$

式中:σ_θ 为洞室切向应力;σ_L 为洞室轴向应力;σ_C 为岩石单轴抗压强度。

2.4　能量释放率(ERR)

$$\begin{cases}W_r = \dfrac{1}{2}\int S_m u_i T_i \mathrm{d}s\\ \mathrm{ERR} = W_r/V\end{cases} \tag{4}$$

式中:W_r 为某一动态开挖步骤中围岩所释放的能量;S_m 为本步开挖而暴露出的表面积;u_i 为开挖引起的围岩次生位移;T_i 为本步开挖前围岩中的表面牵引力;V 为开挖岩体总体积。

2.5　局部能量释放率(LERR)

$$\begin{cases}\mathrm{LERR} = U_{i\max} - U_{i\min}\\ U_{i\max} = \dfrac{1}{2E}[\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - 2\nu(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_1\sigma_3)]\\ U_{i\min} = \dfrac{1}{2E}[\sigma'^2_1 + \sigma'^2_2 + \sigma'^2_3 - 2\nu(\sigma'_1\sigma'_2 + \sigma'_2\sigma'_3 + \sigma'_1\sigma'_3)]\end{cases} \tag{5}$$

式中:$U_{i\max}$ 为第 i 个单元脆性破坏前的弹性应变能密度最大值;$U_{i\min}$ 为第 i 个单元脆性破坏前的弹性应变

能密度最小值；σ_1、σ_2、σ_3 为单元应变能最大值对应的 3 个主应力；σ'_1、σ'_2、σ'_3 为单元应变能最小值对应的 3 个主应力；E 为弹性模量；ν 为泊松比。

2.6 围岩强度比

$$\begin{cases} \sigma_C/\sigma_{max} < 4\text{（可能发生严重岩爆）} \\ \sigma_C/\sigma_{max} = 4 \sim 7\text{（可能发生轻微或中等岩爆）} \\ \sigma_C/\sigma_{max} > 7\text{（无岩爆）} \end{cases} \quad (6)$$

式中：σ_C 为岩石单轴抗压强度；σ_{max} 为围岩最大地应力。

3 岩爆预测的数值模型

3.1 数值模型及边界约束条件

为保证数值模拟结果真实可靠，在采用三维有限差分软件进行求解动力学问题时，依据圣维南原理和隧洞开挖的影响范围[29]。建立的数值模型 X 方向为 200 m、Z 方向为 100 m、Y 方向为 50 m，数值模型共 1 050 500 个六面体单元、1 113 381 个网格节点，数值计算模型见图 4、监测点的布置见图 5。在动力计算时，阻尼设置为 Rayleigh 阻尼、最小临界阻尼比取 0.04、最小中心频率取 550 Hz。该数值模型 Z 方向的上边界为应力边界条件，施加 58.09 MPa 垂直载荷；Z 方向的下边界、Y 方向的前后边界和 X 方向的左右边界受位移约束；为了减小或消除模拟计算所产生的弹性波反射，在模型外围边界设定为静态边界，以期为计算模型提供等同于无限场地的约束效果[30]，如图 6 所示。

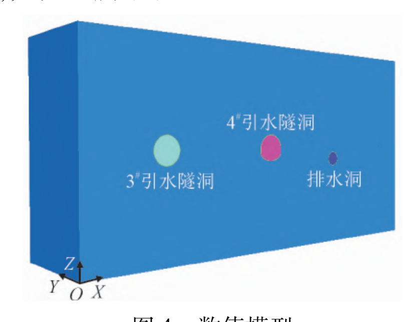


图 4 数值模型

Fig. 4 Numerical model

3.2 爆破荷载作用形式

在数值分析中爆破荷载常假定为一个三角形冲击波[31-32]，如图 7 所示。三角形函数爆炸荷载历程曲线表达式，如式（7）。通过对 FLAC^{3D} 软件进行二次开发，采用 FISH 编写程序语言来进行爆破荷载的施加（t_r 为 0.3 ms、t_d 为 1.5 ms、爆破荷载峰值为 60 MPa，并利用 APPLY 命令施加到隧道开挖轮廓面）。

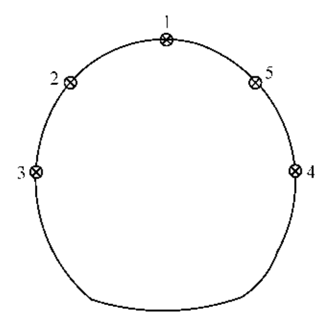


图 5 4#引水隧洞监测点位置

Fig. 5 Monitoring point position of 4# headrace tunnel

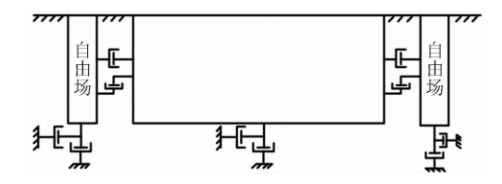


图 6 自由场边界示意

Fig. 6 Free field boundary

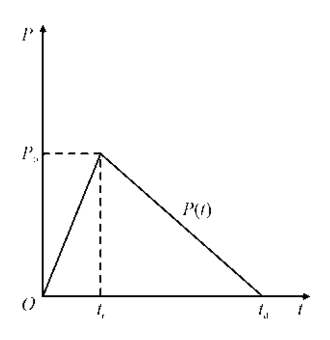


图 7 爆破荷载曲线

Fig. 7 Blasting load curve

$$P(t) = \begin{cases} 0 & t < 0, t > t_d \\ \dfrac{t}{t_r}P_0 & 0 \leqslant t < t_r \\ \dfrac{t_d - t}{t_d - t_r}P_0 & t_r \leqslant t \leqslant t_d \end{cases} \quad (7)$$

式中：$P(t)$ 为任一时刻的爆破荷载压力值；P_0 为爆破荷载峰值；t_r 为爆破荷载上升至峰值的时间；t_d 为爆炸荷载的正压作用时间。

3.3 本构模型及材料力学参数

在数值计算中，数值模型的本构关系采用描述硬岩力学行为的弹塑性模型[33]。围岩的物理力学参数参照文献[22]，如表 2 所示。本模拟对岩石岩性作出假设：岩石为均质、各向同性的连续体，符合

弹塑性强度准则，材料参数满足弹塑性本构模型关系[30]。

表 2　岩体的物理力学参数

Tab. 2　Physical and mechanical parameters of rock

弹性模量/GPa	泊松比	黏聚力峰值/MPa	黏聚力残余值/MPa	摩擦角初始值/(°)	摩擦角峰值/(°)	剪胀角/(°)
27.62	0.256	34.36	9.87	29.93	39.93	29.20

3.4　计算分析与岩爆预测

由图 1 可知，4#引水隧洞在洞室掌子面后方约 80 m 范围内发生了岩爆[22]。该隧洞开挖为上下台阶法，仅对洞室进行上台阶开挖时(开挖高度8.5 m，见图 3)，4#引水隧洞就发生了岩爆现象。因此，在对该隧洞进行岩爆倾向性分析时，选取了发生岩爆区域的中间位置(标段为 K9 +765 附近)。

1) 基于 Hoek 判据分析

通过数值计算获得 4#引水隧洞横剖面的 Hoek 岩爆判据和弹性应变能密度时空分布，如图 8、图 9 所示。

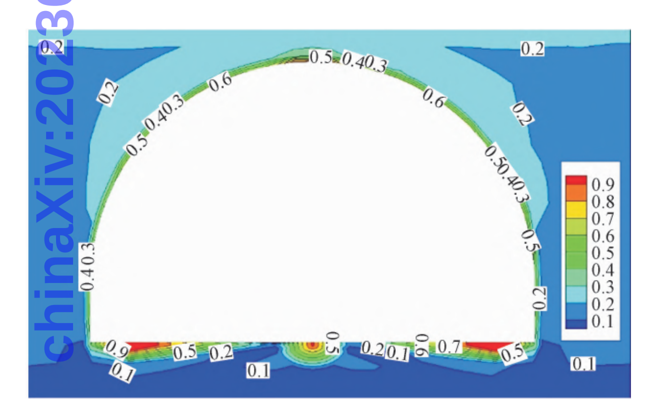


图 8　Hoek 岩爆判据分布

Fig. 8　Hoek rockburst criterion distribution

由图 8 可知，采用 Hoek 判据分析时，隧洞掌子面的左侧边墙与左拱脚附近处最大指标值约为 0.9，指标值大于 0.7 的深度约为 1.5 m；右侧边墙与右拱脚附近处最大指标值约为 0.85，指标值大于 0.7 的深度约为 0.8 m。隧洞在开挖后，拱顶、左右拱腰、边墙及拱脚处出现弹性应变能积聚现象，最大积聚深度约 1.2 m，且出现了深度为 0.7 m 左右的拉裂损伤区。由图 9 可知，从监测点的不同位置分析，在隧道掘进的瞬间，隧道不同部位所释放的弹性应变能有所不同，其中隧洞两侧边墙所储存的应变能略高于拱顶处存储的应变能，在左侧边墙处最大，最大值为 2 372 MJ/m^3、在拱顶处为 2 115 MJ/m^3。

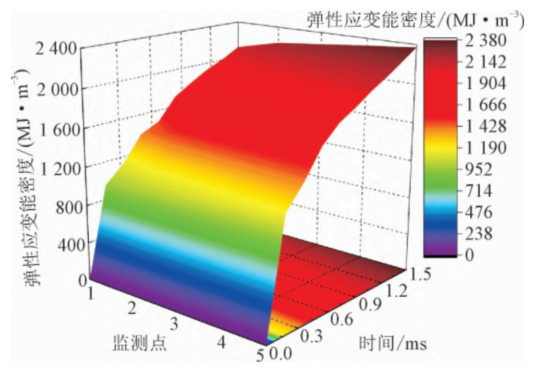


图 9　弹性应变能密度时空分布(Hoek 岩爆)

Fig. 9　Space-time distribution of strain energy density (Hoek rockburst)

2) 基于 Russenes 和 Turchaninov 判据分析

通过数值计算，获得 4#引水隧洞横剖面的 Russenes 和 Turchaninov 岩爆判据和弹性应变能密度时空分布，如图 10 ~ 图 13 所示。由图 10 ~ 图 13 分析可知，采用 Russenes 判据对隧洞进行岩爆倾向性分析时，隧洞掌子面的左边墙与左拱脚附近处最大指标值约为 1.2，指标值大于 0.55 的深度约为 1.4 m；右侧边墙与右拱脚附近处最大指标值约为 1.1，指标值大于 0.55 的深度约为 0.9 m；由图 11 还可知，隧洞左右两侧边墙以及拱顶处的弹性应变能分别为 2 420 MJ/m^3、2 326 MJ/m^3 和 2 226 MJ/m^3。采用 Turchaninov判据分析时，隧洞掌子面的左侧边墙与左拱脚附近处最大指标值约为 1.4，指标值大于 0.8 的深度约为 2.1 m；右侧边墙与右拱脚附近处最大指标值约为 1.2，指标值大于 0.8 的深度约为 1.7 m；由图 13 还可知，隧洞左右两侧边墙以及拱顶处的弹性应变能分别为 2 334 MJ/m^3、2 286 MJ/m^3 和 2 128 MJ/m^3。

通过对比 Hoek 判据、Russenes 判据和 Turchaninov 判据对岩爆倾向性的分析结果可知，三者数值计算结果均表明在隧洞关键部位边墙处，左侧边墙相比右侧边墙更易发生岩爆，现场实际情况则表明隧洞掌子面左侧边墙发生了严重岩爆，而右侧边墙并未发生岩爆[22]；但是，在预测岩爆发生的位置方面，Turchaninov 岩爆判据预测隧洞掌子面的左侧边墙岩爆位置更靠近隧洞掌子面的墙角部位，因此，Turchaninov判据与 Hoek 判据、Russenes 判据相比较，Turchaninov 判据预测岩爆发生的位置与现场情况更符合；在预测岩爆产生的破坏深度方面，三者数值计算结果均表明对隧洞左侧边墙预测深度较为接近，Russenes 判据预测的深度略小于 Hoek 判据和

Turchaninov 判据,该部位实际岩爆发生的破坏深度约为 2 m。

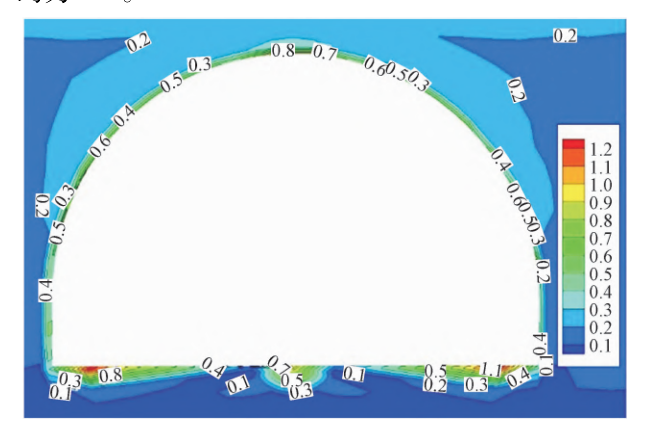


图 10　Russenes 岩爆判据分布

Fig. 10　Russenes rockburst criterion distribution

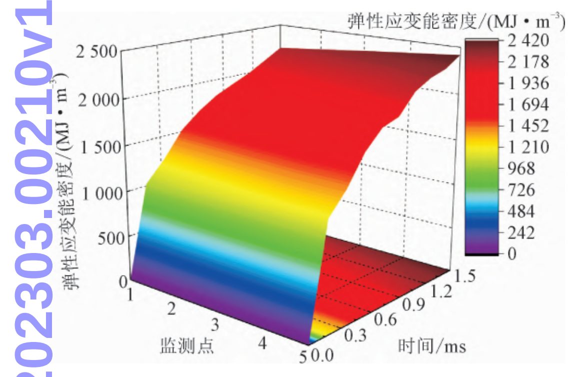


图 11　弹性应变能密度时空分布(Russenes 岩爆)

Fig. 11　Space-time distribution of strain energy density (Russenes rockburst)

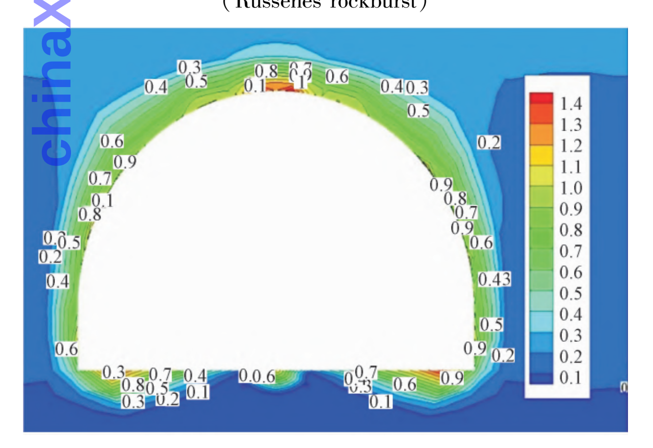


图 12　Turchaninov 岩爆判据分布

Fig. 12　Turchaninov rockburst criterion distribution

3)基于 ERR 和 LERR 指标分析

由于目前尚不明确 ERR 与岩爆倾向性之间的关系,因此无法依据 ERR 阈值来评估岩爆的倾向性和量化岩爆的烈度等级。但 ERR 方法适用于施工方案的比选研究,亦可总体上描述岩爆的破坏位置、范围和深度。例如,运用 ERR 指标,采用钻爆法对隧洞进行全断面和台阶法开挖,所得隧洞横剖面内 ERR 分布状态如图 14 所示。由图 14 可知,采用全断面法和上下台阶法开挖后计算得到的 ERR 阈值分别为 2.54×10^3 MJ/m^3 和 2.34×10^3 MJ/m^3,这表明了采用台阶法开挖隧道诱发岩爆的风险以及岩爆烈度明显小于全断面法开挖。

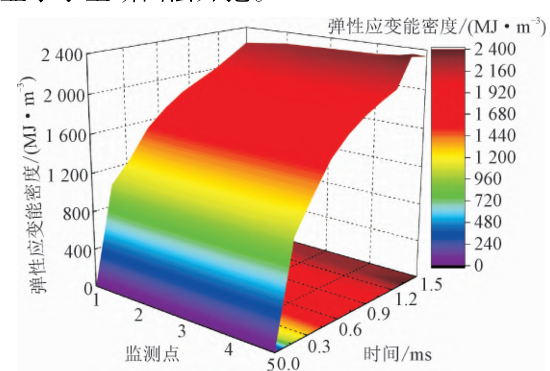


图 13　弹性应变能密度时空分布(Turchaninov 岩爆)

Fig. 13　Space-time distribution of strain energy density (Turchaninov rockburst)

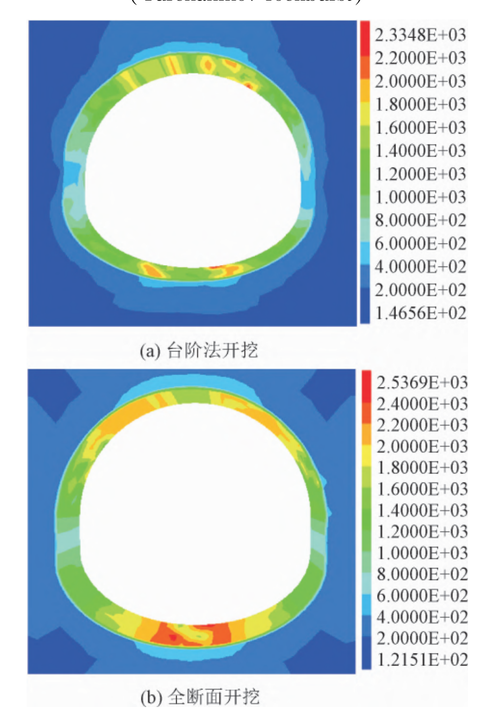


图 14　隧洞横剖面内 ERR 分布状态(单位:MJ/m^3)

Fig. 14　ERR distribution of tunnel transverse section (unit: MJ/m^3)

通过数值计算获得的隧洞横剖面内 LERR 和弹性应变能密度时空分布状态,如图 15 ~ 图 16 所示。由图 15 ~ 图 16 分析可知,在隧洞掌子面左侧边墙和右侧拱腰处,围岩局部能量释放最多,且分布范围较广,LERR 最大值为 2.91×10^3 MJ/m^3。运用 LERR 判据指标在预测隧洞掌子面左右边墙及拱腰部位产

生的围岩能量释放率时，隧洞掌子面右侧边墙和拱腰部位略大于隧洞掌子面左侧边墙，现场实际情况则表明隧洞左侧边墙部位发生了岩爆，右侧边墙的混凝土喷层出现了膨胀开裂（见图 17）[34]。

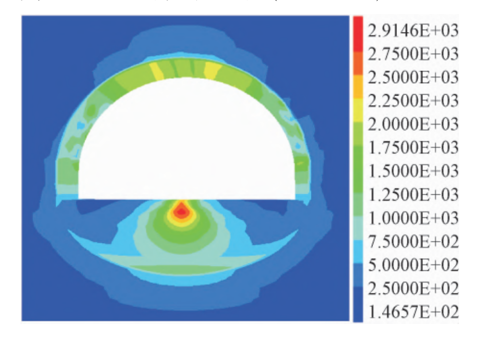


图 15　隧洞横剖面内 LERR 分布状态（单位：MJ/m^3）

Fig. 15　LERR distribution of tunnel transverse section (unit: MJ/m^3)

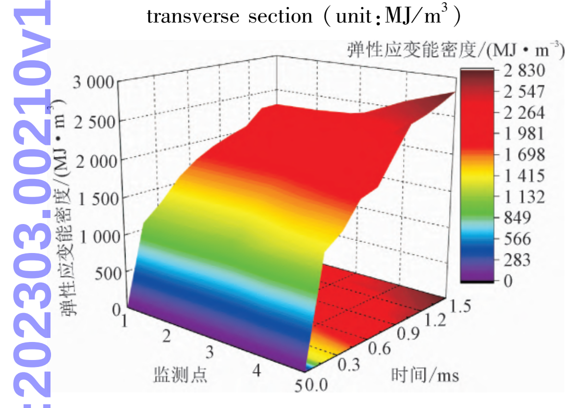


图 16　弹性应变能密度时空分布

Fig. 16　Space-time distribution of strain energy density

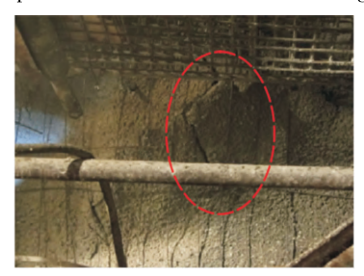


图 17　4#引水隧洞右拱肩喷层鼓胀开裂[34]

Fig. 17　Cracks at right spandrel of 4# headrace tunnel[34]

4）基于围岩强度比分析

由图 18～图 19 分析可知：隧洞最大岩爆坑位于左侧边墙及拱脚处，这与现场情况接近，最大岩爆坑的深度约为 5.6 m；由隧洞现场破坏形状可知，采用围岩强度比作为岩爆判据的数值模拟结果与实际岩爆坑的形状（见图 20）基本吻合，也验证了围岩强度比作为岩爆判据的合理性，这也进一步表明洞室周围岩体破裂演化的平缓加速历程亦是围岩内部能量不断积聚、耗散的过程，应力值的突变导致围岩大小主应力差变大，使得能量积聚增加，应力产生高度集中超过了围岩屈服强度，使围岩发生宏观破坏，迅速向外释放能量导致岩体出现大变形与岩爆破坏。结合图 18～图 19 可知，隧洞掌子面右侧边墙及拱腰部位发生了以剪切破坏为主的突发性破坏，而现场实际情况中该位置的混凝土喷层也出现了膨胀开裂（见图 17）。

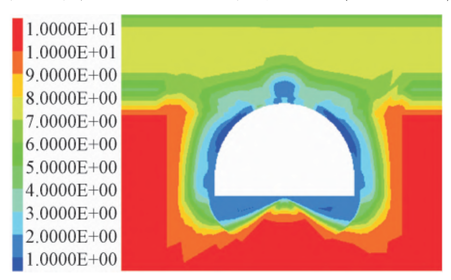


图 18　围岩强度比

Fig. 18　Strength-stress ratio of surrounding rock

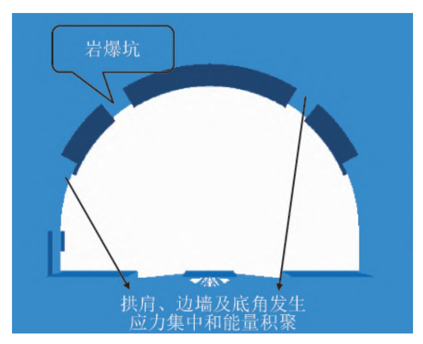


图 19　岩爆模拟示意

Fig. 19　Sketch of rockburst simulation

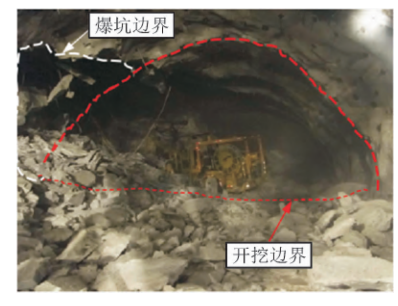


图 20　现场岩爆坑示意[34]

Fig. 20　Sketch of rockburst areas in situ[34]

5）综合分析

本研究在数值计算的基础上，采用 Hoek 判据、Russenes 判据、Turchaninov 判据、ERR 指标、LERR 指标和围岩强度比 6 个指标，对锦屏Ⅱ级水电站 4# 引水隧洞的岩爆倾向性进行了预测评估。

Hoek 判据、Russenes 判据和 Turchaninov 判据三者数值计算结果均表明，引水隧洞左右两侧边墙发生了岩爆，且在引水隧洞左侧边墙较右侧边墙更容易发生岩爆，现场实际为隧洞左侧边墙出现了严重岩爆，右侧边墙并未发生岩爆；三者数值计算结果表明预测隧洞左侧边墙岩爆破坏深度为 1.5 m～2.1 m，

该部位现场实际岩爆破坏深度约为 2 m。从能量的角度采用 ERR 指标和 LERR 指标进行隧洞岩爆倾向性分析可知,隧洞进行全断面和台阶法开挖时,台阶法发生岩爆的风险以及岩爆烈度明显小于全断面法。在隧洞左侧边墙和右侧拱腰位置处围岩局部能量释放区域最多,且分布范围较广,LERR 最大值为 2.91×10^{3} MJ/m^{3}。采用围岩强度比指标分析时,隧洞最大岩爆坑位于掌子面左侧边墙及拱脚处,这与现场情况接近,最大岩爆坑的深度约为 5.6 m;隧洞掌子面右侧边墙及拱腰部位的混凝土喷层出现了膨胀开裂。

采用上述 6 个判据指标,从多个角度预测评估了锦屏Ⅱ级水电站 4#引水隧洞的岩爆倾向性(ERR 判据指标仅进行了开挖方案的比较分析),各指标的数值计算结果均表明该洞段有很强的岩爆倾向性,但数值分析结果与现场实际发生岩爆情况略有差别。因此,要想准确进行岩爆的预测预报,还需针对同一个问题从多方面、全方位和多角度分析并进行综合评估。

4 结　论

基于动力数值分析,结合 Hoek 判据、Russenes 判据、Turchaninov 判据、ERR 指标、LERR 指标和围岩强度比 6 个指标,并以锦屏Ⅱ级水电站 4#引水隧洞为工程背景,对岩爆倾向性进行了定性判断,得到了如下结论。

1)在预测岩爆发生的位置方面,Turchaninov 岩爆判据预测隧洞掌子面的左侧边墙岩爆位置更靠近隧洞掌子面的墙角部位,Turchaninov 判据预测岩爆发生的位置与现场情况更符合。

2)采用 ERR 指标对开挖方案进行分析时,台阶法开挖发生岩爆的风险以及岩爆烈度明显小于全断面法开挖。采用 LERR 指标进行分析时,在隧洞左侧边墙和右侧拱腰位置处围岩局部能量释放区域最多,且分布范围较广,LERR 最大值达到 2.91×10^{3} MJ/m^{3}。

3)采用围岩强度比指标分析时,隧洞掌子面右侧边墙及拱腰部位发生了以剪切破坏为主的突发性破坏,而现场实际情况中该位置的混凝土喷层也出现了膨胀开裂。

参考文献

[1] 魏新江,陈涛涛,王霄,等.岩爆灾害研究与进展[J].现代隧道技术,2020,57(2):1-12.(WEI Xinjiang,CHEN Taotao,WANG Xiao,et al. Progress in research of the Rockburst Hazard[J]. Modern tunnelling technology,2020,57(2):1-12(in Chinese)).

[2] 冯夏庭,肖亚勋,丰光亮,等.岩爆孕育过程研究[J].岩石力学与工程学报,2019,38(4):649-673.(FENG Xiating,XIAO Yaxun,FENG Guangliang,et al. Study on the development process of rockbursts[J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering,2019,38(4):649-673(in Chinese)).

[3] GONG Weili,PENG Yanyan,HE Manchao,et al. Fracture angle analysis of rockburst failure planes based on true-trixial experiment[J]. Rock mechanics and rock engineering,2015,48(9):1017-1039.

[4] 张文东,马天辉,唐春安.锦屏二级水电站引水隧硐岩爆特征及微震监测规律研究[J].岩石力学与工程学报,2014,33(2):339-348.(ZHANG Wendong,MA Tianhui,TANG Chun'an. Research on rock burst characteristics and microseismic monitoring law of diversion tunnel and tunnel of Jinping Ⅱ hydropower station[J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering,2014,33(2):339-348(in Chinese)).

[5] ZHOU J,LI X B,MITRI H S. Evaluation method of rockburst:state-of-the-art literature review[J]. Tunnelling and underground space technology,2018,81:632-659.

[6] 严鹏,陈拓,卢文波,等.岩爆动力学机理及其控制研究进展[J].武汉大学学报(工学版),2018,51(1):1-14.(YAN Peng,CHEN Tuo,LU Wenbo,et al. A review of dynamic mechanism and controlling of rockburst engineering[J]. Journal of Wuhan University,2018,51(1):1-14(in Chinese)).

[7] 李鹏翔,陈炳瑞,周扬一,等.硬岩岩爆预测预警研究进展[J].煤炭学报,2019,44(增刊2):447-465.(LI Pengxiang,CHEN Binrui,ZHOU Yangyi,et al. Review of the research progress of rockburst prediction and early warning in hard rock underground engineering[J]. Journal of China coal society,2019,44(S2):447-465(in Chinese)).

[8] 周瑞忠.岩爆发生的规律和断裂力学机理分析[J].岩土工程学报,1995,17(6):111-117.(ZHOU Ruizhong. Regularity of rockbursts and its analysis based on the fracture mechanics[J]. Chinese journal of geotechnical engineering,1995,17(6):111-117(in Chinese)).

[9] 谢和平,PARISEAU W G.岩爆的分形特征和机理[J].岩石力学与工程学报,1993,12(1):28-37.(XIE Heping,PARISEAU W G. Fractal character and mechanism of rockbursts[J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering,1993,12(1):28-37(in Chinese)).

[10] 章梦涛.冲击地压失稳理论与数值模拟计算[J].岩石力学与工程学报,1987,6(3):197-204.(ZHANG Mengtao. Instability theory and mathematical model for coal/rock bursts[J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering,1987,6(3):197-204(in Chinese)).

[11] 潘岳.围岩-矿柱系统失稳冲击的能量-外力功理论[J].有色金属,1992,17(4):18-25.(PAN Yue. Energy-work theory for shock burst of country rock-pillar system[J]. Nonferrous metals engineer-

ing,1992,17(4):18-25(in Chinese)).

[12] KIDYBINNSKI A. Bursting liability indices of coal[J]. International journal of rock mechanics and mining sciences & geomechanics abstracts,1981,18(2):295-304.

[13] SINGH S P. Assessment of the rockburst proneness in hard rock mines[C]//Proceedings of 5th Conference on Ground Control in Mining. West Virginia:[s. n.],1986:242-248.

[14] 冯夏庭. 地下峒室岩爆预报的自适应模式识别方法[J]. 东北大学学报,1994,15(5):471-475. (FENG Xiating. Adaptive pattern recognition to predict rockbursts in underground openings[J]. Journal of Northeastern University(natural science),1994,15(5):471-475(in Chinese)).

[15] SAJJAD A,KOUROSH S,SAYYED H M. Developing intelligent classification models for rock burst prediction after recognizing significant predictor variables,Section 2:Designing classifiers[J]. Tunnelling and underground space technology,2019,84:235-258.

[16] ZHANG Shichao,MA Tianhui,TANG Chunan,et al. Microseismic monitoring and experimental study on mechanism of delayed rockburst in deep-buried tunnels[J]. Rock mechanics and rock engineering,2020,53(6):2771-2788.

[17] 吴枋胤,何川,汪波,等. 基于洞壁实测信息的 FA-PP 岩爆预测模型应用研究[J]. 中国公路学报,2020,45(6):1-13. (WU Fangyin,HE Chuan,WANG Bo,et al. Application research of FA-PP rockburst prediction model based on measured information of tunnel wall[J]. China journal of highway and transport,2020,45(6):1-13(in Chinese)).

[18] 陈雪锋,陈文涛,苗永春. 基于熵权 TOPSIS 法的岩爆预测[J]. 煤炭技术,2018,37(6):38-40. (CHEN Xuefeng,CHEN Wentao,MIAO Yongchun. Rock burst prediction based on entropy weight TOPSIS method[J]. Coal technology,2018,37(6):38-40(in Chinese)).

[19] MICHAL K,PAWEL B,JERZY M. Determination and validation of Karagozian-Case concrete constitutive model parameters for numerical modeling of dolomite rock[J]. International journal of rock mechanics and mining sciences,2020,129:1022-1036.

[20] PAWEL B,MICHAL K,ROMAN G,et al. Fracture and fragmentation of dolomite rock using the JH-2 constitutive model:parameter determination experiments and simulations[J]. International journal of impact engineering,2020,140:652-668.

[21] 王鹰,蔡扬,魏有仪,等. 引汉济渭工程秦岭隧洞岩爆数值模拟与岩爆预测研究[J]. 西藏大学学报(自然科学版),2016,31(1):89-96. (WANG Ying,CAI Yang,WEI Youyi,et al. Research on numerical simulation and prediction of rock burst at Qinling tunnel in the Yinghan-Weihe river project[J]. Journal of Tibet University,2016,31(1):89-96(in Chinese)).

[22] 周辉,杨凡杰,张传庆,等. 岩爆与冲击地压数值模拟与评估预测方法[M]. 北京:科学出版社,2015.

[23] ZHANG Chuanqing,FENG Xiating,ZHOU Hui,et al. Case histories of four extremely intense rockbursts in deep tunnels[J]. Rock mechanics and rock engineering,2012,45(3):275-288.

[24] SALAMON M D G. Stability,instability and design of pillar workings[J]. International journal of rock mechanics & mining ences & geomechanics abstracts,1970,7(6):613-631.

[25] STARFIELD A,FAIRHURST C. How high-speed computers advance design of practical mine pillar systems[J]. Engineering and mining journal,1968,169(5):78-84.

[26] COOK N G W,HOEK E P,PRETORIUSJ P G,et al. Rock mechanics applied to the study of rockbursts[J]. South African institute of mining and metallurgy,1966,66(10):435-528.

[27] COOK N G W. A note on rockbursts considered as a problem of stability[J]. South African institute of mining and metallugy,1965,5(65):437-446.

[28] HOEK E,BROWN E T. Underground excavation in rock[M]. London:Institute of Mining and Metallugy,1980.

[29] 刘希亮,孙飞跃,郭佳奇,等. 深部巷道组合钢架合理支护间距数值模拟研究[J]. 河南理工大学学报(自然科学版),2021,40(6):34-42. (LIU Xiliang,SUN Feiyue,GUO Jiaqi,et al. Numerical simulation study on the reasonable yielding space of composite steel frame support in deep roadways[J]. Journal of Henan Polytechnic University(natural science),2021,40(6):34-42(in Chinese)).

[30] 孙飞跃,范俊奇,郭佳奇,等. 基于能量原理的岩爆倾向性判据[J]. 高压物理学报,2021,35(3):158-172. (SUN Feiyue,FAN Junqi,GUO Jiaqi,et al. Rockburst proneness criterion based on energy principle[J]. Chinese journal of high pressure physics,2021,35(3):158-172(in Chinese)).

[31] 骆正坤,李新平,孙吉主,等. 深埋跨断层隧道爆破开挖动力响应规律研究[J]. 爆破,2020,30(12):1-7. (LUO Zhengkun,LI Xinping,SUN Jizhu,et al. Study on dynamic response law of blasting excavation of deep buried cross fault tunnel[J]. Blasting,2020,30(12):1-7(in Chinese)).

[32] 周航,陈仕阔,张广泽,等. 基于功效系数法和地应力场反演的深埋长大隧道岩爆预测研究[J]. 工程地质学报,2020,34(2):1-11. (ZHOU Hang,CHEN Shikuo,ZHANG Guangze,et al. Rockburs predicition in deep lying and long tunnel based on efficiency coefficient method and ground stress filed inversion[J]. Journal of engineering geology,2020,34(2):1-1(in Chinese)).

[33] 彭文斌. FLAC 3D 实用教程[M]. 北京:机械工业出版社,2008.

[34] 杨凡杰,周辉,卢景景,等. 岩爆发生过程的能量判别指标[J]. 岩石力学与工程学报,2015,34(增刊1):2706-2714. (YANG Fanjie,ZHOU Hui,LU Jingjing,et al. An enegry criterion in process of rockburst[J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering,2015,34(S1):2706-2714(in Chinese)).

(编辑　李坤璐)